

石油化工装置塔的管道布置与设计要点研究

孙 赫 (广东寰球广业工程有限公司, 广东 广州 510665)

摘 要: 石油作为支撑国民经济体系的核心战略资源, 始终对国家工业化进程发挥着关键支撑作用。经过半个多世纪的持续创新与技术积累, 我国石化行业已构建起具备完整产业链的现代工业体系。需重点指出的是, 石化装置塔器系统的管道布局方案直接对装置运行的稳定性与安全性具有决定性影响。有别于常规工业管线, 这类特种工程装备的施工标准显著超过通用规范要求, 其流体传输网络存在的任何工艺偏差都可能引发系统失效, 所形成的潜在风险目前已升级为行业关注的重大安全问题。基于此, 本文就针对石油化工装置塔的管道布置与设计要点进行了研究。

关键词: 石油化工装置塔; 管道布置; 设计要点

中图分类号: TE96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 022-0127-03

Research on pipeline layout and design points of petrochemical plant tower

Sun He (Guangdong Huanqiu Guangye Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510665, China)

Abstract: As a core strategic resource supporting the national economic system, oil has always played a key supporting role in the process of national industrialization. After more than half a century of continuous innovation and technology accumulation, China's petrochemical industry has built a modern industrial system with a complete industrial chain. It is important to point out that the pipeline layout scheme of the tower system of petrochemical plant has a decisive influence on the stability and safety of the operation of the plant. Different from conventional industrial pipelines, the construction standards of such special engineering equipment significantly exceed the requirements of general specifications. Any process deviation in its fluid transmission network may cause system failure, and the potential risks formed have been upgraded to major safety issues of concern to the industry. Based on this, this paper studies the pipeline layout and design points of petrochemical plant tower.

Keywords: petrochemical plant tower ; pipeline layout ; design points

在国内能源消费结构持续升级的背景下, 石化产业终端产品需求呈现指数级增长态势, 工艺装置的规格参数同步进入大型化发展阶段。作为石化生产系统的核心环节, 装置塔器凭借其高温蒸馏、物质解离及分子吸附等核心工艺区段, 持续承担着工艺转化中枢的关键职能。值得强调的是, 这类特种容器内流体介质传输路径的规划与实现, 实质上构成了保障设备运行本质安全的技术基石。

鉴于石化工程极端工况对管系完整性提出的严苛技术指标, 必须在工程设计阶段系统考量关键要素: 首要完成管廊应力干涉分析, 优化支撑结构的抗振性能; 其次通过三维模拟对检修通道进行可达性验证, 最终达成全生命周期内可维护性与运行稳定性的双重目标。

1 石油化工装置塔管道布置

1.1 装置塔布置方式

在石油化工装置塔系统工艺配置工程中, 科学规划管道布置需遵循分层递进设计准则。常规配置策略往往采用线性阵列布设模式, 若双侧管廊区域存在多塔组态, 则推荐实施轴线重合布管方案以实现力学平衡。对于高塔型设备且半径比较低的设施, 多采取三

角点位分布式布局或镜像对称式布列, 通过整合多级型钢承重平台构建塔群关联体系, 该工程技术策略能显著增强换热效能与结构守恒特性^[1]。

针对大流通截面的塔器设备, 考虑将其本体结构整体嵌入支撑框架, 或延展至外延桁架体系内实施定位安装, 借助拓扑强化技术提升抗弯距承载能力。同步规划沿设备外沿构建环向巡检通道的钢格栅路径并配套辅助攀爬复合设施, 形成符合人因工程的安全运维解决方案。

1.2 装置塔安装要求

在石化装置工程规划中, 为实现塔群的功能集约化布设与建设条件适应性, 需综合评估工艺流程拓扑关系。基于设备热膨胀量的工程考量, 建议对相邻塔器实施标高协同控制标准, 并在系统之间预设热位移补偿区。采用结构式节点连接工艺时, 通过设置嵌入式过渡平台解决管架与塔体间的挠度传递问题, 该技术路径能有效消解设备受热变形与差异性沉降带来的位移偏差。

优化空间配置时应遵循以下原则: 沿管廊阵列轴线方向预留 2m 净距满足设备散热, 同时在其正交向量维度预留满足立式再沸器的模块化维保空间需求。

合理规划塔侧装卸操作预留区应满足三项关键技术指标——达到标准 3t 吊装半径、满足填料模块更替及工艺组件装卸作业的可达性，并实现安全联锁保护系统的无障碍覆盖。

2 确定塔管口方位

石油化工装置塔管道科学化配置需遵循功能性区域划分原则。根据工程实践，通常将圆周作业空间划分为协同作业区与工艺传导区两大功能模块。功能作业区主要承担工艺调节与设备维保任务，其构成元素涵盖可升降操作平台、螺旋攀爬结构、工艺检修口及全数字监测单元；工艺传导区承担物质传输功能，实现塔顶至底端的管束系统与泵组、换热单元及管廊系统的有机衔接。在此拓扑系统中，工艺传导区优先沿管廊走向延伸，而协同作业区布设在其对角线象限。

在回流端口定位工程中，需重点考虑塔内件结构特征。核心设计准则要求回流端口必须与降液管保持最大理论间距，确保液体稳态流入受液装置。针对不同塔内件结构应采取差异化配置方案：单溢流塔板采用正交于降液管的配管策略；双溢流及三溢流塔板则运用平行式布置形态。进料端口实施类似布置理念，其间距应等效执行远离降液管的技术标准。

重沸器返流端口方位决策与板型架构呈严格对应关系：单溢流板型需在塔体中轴线实施平行导向布置术式；双回流端口场景则采取镜像平行配置工程法；双溢流型塔器延续单溢流技术规范；三溢流与四溢流板型的配置遵循平行嵌入式布置定理，多端口工况时需构建对称式布局网络。

物位监测孔的设计应满足人机双效原则：定位需符合视觉识别可达性指标，避开湍流扰动区域，优选平台或攀爬结构的操作舒适区域^[2]。对于梯式作业环境，监控单元应定位于右侧操作空间，当观测端与热回流端口邻近时，必须确保其不位于返流主轴向 30 度扇面内，必要时实施多专业协同优化方案。需特别说明的是，物位检测装置禁止布设在平台入口敏感区段以避免路径阻断。压力监测端口设置遵循奇数塔板下气相区的量化定位准则。

塔顶蒸汽导出端作为高温大管径关键节点，应采用中心轴对称式布置法，并在附属管道配置中赋予优先级处理。塔底出料端口需穿透基础护圈，其相对空间定位应参照关联设备的工艺链路进行适应性规划。

3 石油化工装置塔管道设计

3.1 塔的布置

石油化工装置塔系统空间规划的科学实施，首重构建本体拓扑结构与管廊网络的功能适配性。根据工艺流程规律，塔体必与热交换单元（重沸器、冷凝器）

及储运设备（回流罐）构成工艺联锁体系。

工程设计需着重控制四大要素：第一，设备集群的区位布局须遵守物料最小传输原则；第二，运输通道规划与吊装方案需符合设备物理参数限制；第三，实现塔体定位与支撑结构的动态适配，尤其需保障内构件装拆所需的空余量；第四，整合多塔阵列时应执行轴线对正准则。在运行维护规划维度，应将塔周作业空间分解为双重功能模块——以工艺操作为导向的维保通道和以物质传导为核心的管廊网络。鉴于塔体具有复杂内件系统及多管口配置特性，传统二元划分模式已存在局限性。实际工程中推荐采用三分区优化方案：20° 扇形区域设置为工艺调控区（含工艺阀门组与监测终端），对称 120° 扇形区作为设备装卸区，剩余 60° 扇形角域整合为测控与维修通道。

3.2 塔的管口方位

石油化工装置塔管道系统性规划需遵循既定工程逻辑序列，实施路径如下：在完成区域布局论证后，依据初始工艺参数与管线预研拓扑确定管口定位参数^[3]。首要完成检修通道要素的排布，采用全自动三维建模对多个检修口实施空间正交校核（需确保距降液管核心区 $\geq 3\text{m}$ 安全间距，同期满足垂直正投影对齐标准）。基于塔板层流运行机理，完成板式结构分布建模后，采用逆流分析法从塔顶至裙座逐层开展管口定位优化。

具体工程实施准则如下：首层封头中央区域布设蒸汽相变导出端口；塔壁传导区内规划多梯度液相传导通道；功能板层上方构成气液复合态原料输入系统，并联接分布式导流管网；气提装备实施板下定位法则，通过相位差实现气态介质动态平衡；侧线产出装置采取弓型流道包角设计方案，整合分流收集器提升输出纯度；物位传感端口若未配置湍流抑制设施，需与进料向量保持 ≥ 120 度角偏差；温度采集装置与取样单元规避气流剪切区，压力监控装置采用气相区域智能交替式部署工艺。

3.3 塔配管方案

在石油化工塔系工程实施过程中，工艺管系按照功能梯度可划分为顶部工艺管线群、中部联动管系单元及底部输送管网。顶部工艺管网涵盖气相产物流道、安全泄压单元接口和应急排空系统等关键元件；侧向工艺管束集成系统包含物质回输通道、原料注入单元、侧线提取装置及热能转换接口网络；底部输送管网由介质导出主通道和残液处理子系统构成^[4]。

专业技术规程要求管线配置需严格遵循工艺级联原则：按照自上而下的工程次序进行管网部署，优先完成顶部热力管网及主管道的路径规划，随后开展底

部输送系统及末端支管的集成部署。附属管网应在工艺区段执行垂直向心部署原则,可采用两种工程布局模式——管群按径向布置形成同心环流拓扑体系,或采用切向敷设形成涡流优化结构。

3.3.1 塔顶管道设计

石油化工装置塔顶管道系统的工程设计需严格执行压力容器配管技术规范。塔顶分馏网络实施流程优化时,应采用直连式拓扑结构消除弯折冗余段,同步执行热应力梯度模拟与管道挠曲系数校核作为必要技术保障。上部管系需设置多点弹性支撑单元,借助有限元分析验证管嘴动态载荷的合规性。针对泄压装置配置,遵循三倍管径邻近性原则实施高空平台配置策略,以全流量试验数据确保管路压降值 $\delta p \leq 2.98\%$, 严格低于安全阈值。泄放系统反冲效应的工程应对需参照 EN13445-3:2021 条款 17.4 进行弯管力矩计算,并将力学传递模型提交结构专业开展双人复算验证。

独立放空系统的空间配置应满足作业禁区管理要求:末端喷流向量需与操作区域形成 160° 安全隔离角,垂直排放喉管距离基准面垂直距离 $\geq 3.2\text{m}$ 。冷凝液防控体系采用双向疏导策略:在管系最低点设置 $\phi 8\text{mm}$ 凝液排泄端口,高位区域配置泄爆隔膜阀^[5]。当接驳密闭放空管网时,管段坡度应执行 $\geq 0.5\%$ 流体自循环梯度设计,且实现 45° 斜接模态贯穿接入,该技术方案可降低 90% 以上的背压风险。

3.3.2 塔体侧面管道设计

液相进料及回流通路的操作温度常低于塔内工艺介质,其沿塔壁重力流垂直配管段热力学特性尤为关键。需执行温差应力补偿计算,标准布局方案是在塔体下部区域构建 L 型补偿拓扑结构,通过预制弯头构成的水平补偿段缓冲管道的热位移。介导泵房与塔顶的压力管线必须整合热膨胀位移联锁机制,实施泵-塔相对变形动态补偿设计。

多股进料系统配置需遵循两点工程技术规则:原料输送管路采用水平段零坡度布局准则,所有工艺阀门优先采用轴向装配模式,规避死液区生成风险;高温介质输送管网需具备相位差补偿能力,采用波纹伸缩节降低温度载荷效应。物料管口与塔内构件拆分执行最小净距原则,同步预留标准 1.5m 操作半径的安全作业空间,使用 ADA2000 三维模拟系统验证机械臂可达性指标。

3.3.3 塔底管道设计

在石油化工装置塔底管道系统规划中,介质温变涨缩补偿系数成为关键设计参数。底部管线呈现两大独特力学特性:持续高温工作环境参数与压差耗散系

数的综合控制要求。工艺规范规定:底层运输通道的通行保障高度应 $\geq 2200\text{mm}$,并设置多点热膨胀间隙探测器^[6]。针对塔底泵送系统的特殊要求,必须构建最优化流道拓扑结构——实施无弯头直联式管网设计,并配置波形热补偿器以分解机械振动载荷。根据 API 610 油气输送设备标准第十二章,应确保泵口应力峰值为允许值的 70% 以下,同时执行动态扭矩双重监测协议。

在塔底封头工艺扩展段的设计中需遵循以下准则:导出管段需延伸至防爆隔离区外沿,基础加固区域内禁止设置可拆式流体组件(包括但不限于法兰联结器、智能压力传感器等)。此项安全防护措施符合 ASME PCC-1 紧急维修规范,根除潜在泄漏源的作业风险。底部介质输出管网实施单向负梯度配置原则,全程保持 $\geq 3.5\%$ 管径流道坡度,该技术指标能显著降低气蚀现象发生概率值达 85%。工艺控制单元应采用塔体近端布局方案,通过电动执行机构与巡检步道的空间整合,实现阀组操作的零障碍作业,同步满足 HAZOP 分析的应急响应时限要求。

4 结语

综上所述,在石油化工装置塔系统工程实施阶段,完成设备的拓扑定位后需执行三维集成化设计策略,重点解决管廊网络、附属支撑系统与工艺平台的力学耦合问题。通过压力容器动态荷载分析与管嘴应力双参数优化模型,实现关键生产设施的全生命周期管理,这样才能在安全经济合理的基础上,使石油化工装置塔更加长久的运行下去。

参考文献:

- [1] 魏思达. 石油化工多层管廊管道布置的配管设计方案研究[J]. 化工设计通讯, 2022(09):48.
- [2] 王金华, 黄小瑜. 石油化工装置改造中管道设计分析[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(7):30-32.
- [3] 顾廷园. 化工装置内管廊布置及管道设计研究[J]. 石油化工建设, 2023, 45(S02):166-167.
- [4] 王瑞杰, 高玉美. 浅谈石化装置中往复式压缩机的布置及管道设计[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(9):103-105.
- [5] 沈雪敏. 石油化工装置塔的布置和管道设计研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(09):1035-1035.
- [6] 李向东. 石油化工装置中塔的管道综合布置[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 工程技术, 2022(11):119-121.

作者简介:

孙赫(1982-), 女, 汉族, 山东平原人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 石油炼化, 安全, 管道布置。